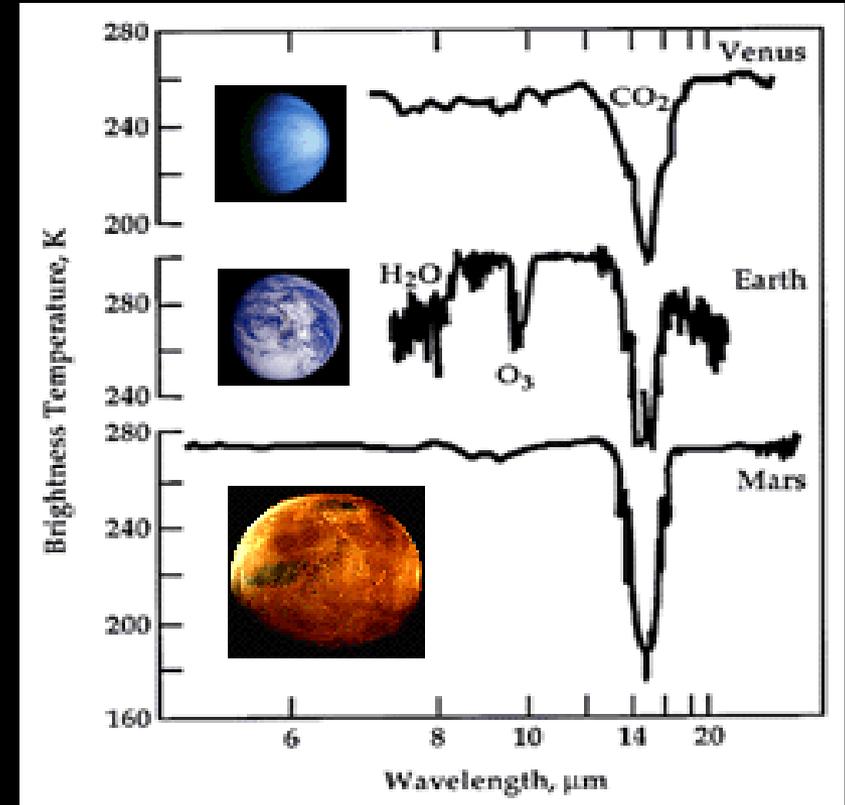
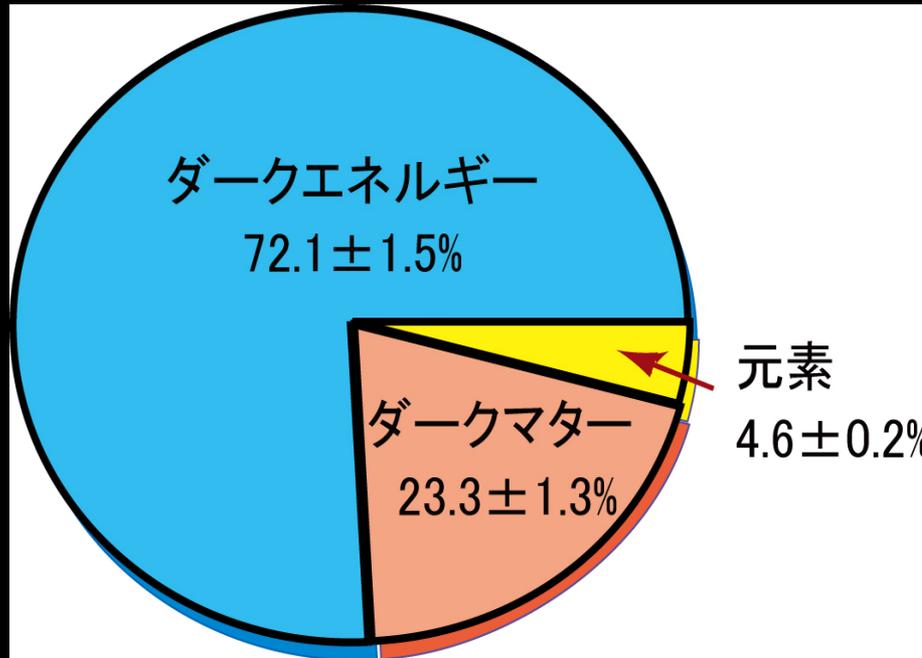


21世紀宇宙物理学の課題



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

高知工科大学 サイエンスカフェ

2009年7月3日 13:10-14:10

役に立たない学問の存在価値

物理教の経典



- 世の中の「本質的なこと」はすべて物理法則によって「自然に」説明できるはずである
- むろん、実際にわかっていない現象も多いが
 - 自由度が多く、初期条件を精度よく推定できないために細かいことまではわからないだけ（複雑系）
 - まだ正しい物理法則の理解に至っていないだけ（すべての相互作用の統一⇒究極理論への道）
- つまり、単に我々がまだ未熟者であるだけで、もっと修行を積みればわかるようになるはず
 - 学者という職業の存在意義
- 「神様」を持ち出す必要はない

役に立つ学問と役に立たない学問

- 「役に立つ」となぜ良いか
 - 生活を便利に⇒自由な時間が増える⇒人生を楽しむ（趣味=音楽、美術、文学、科学）
 - 技術が「売れる」⇒「儲ける」⇒何でも買える⇒人生を楽しむ（趣味=音楽、美術、文学、科学）
- 人生の究極的目的を突き詰めればやがて「役に立たない」ものに帰着
 - 狭義の「役に立つ」は、結局は広義の「役に立たない」を楽しむという文脈において意味をもつ？
- *C'est une occupation très jolie. C'est véritablement utile puisque c'est joli.*
(*Le Petit Prince: Antoine de Saint Exupéry*)

私の考える科学の心

- 謎を解明する(問題に答える)よりも、**新たな謎を発見(世の中の不思議さに感嘆)**するほうが大事
 - **勉強**(つとめはげむ)から **学問**(学びて問う)へ
- **決して競争するな**: 勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない
- **ただし、このような私の価値観は、科学者の間でもあまり受け入れられてはいない**
 - しかし「役に立たない」学問を、その波及効果、あるいは「100年後に役に立つ」学問を生み出すという理由で正当化する論調には賛同しかねる

答えを知るより、疑問に思う心が大切

眼は、いつでも思った時にすぐ閉じることができるようにできている。

しかし、耳のほうは、自分では自分を閉じることができないようにできている。

なぜだろう。

寺田寅彦 1878年11月28日～1935年12月31日

高知県出身

東京帝国大学物理学教授

(大正十年三月、渋柿)

宇宙物理学とは

宇宙物理学の定義

- よくわからない、、、
- とにかく森羅万象を対象とする
- キーワードは、「起源」と「進化」
- 「天文学 (astronomy) 」との違いも明確ではない
- ただし、慣用的に
「宇宙物理学 (astrophysics)
≠ 宇宙論 (cosmology)」
であることだけは確か

宇宙物理学 ≠ 宇宙論

太陽	天体力学	重力多体系
惑星形成	星間物質	構造形成
星形成	元素合成・循環	銀河団プラズマ
降着円盤	銀河進化	宇宙線加速・伝播
第一世代天体	輻射輸送	重力波
中性子星	超新星爆発	相対論
ブラックホール	活動銀河核	余剰次元
ガンマ線バースト		宇宙論
		ダークマター
		ダークエネルギー
		初期宇宙進化

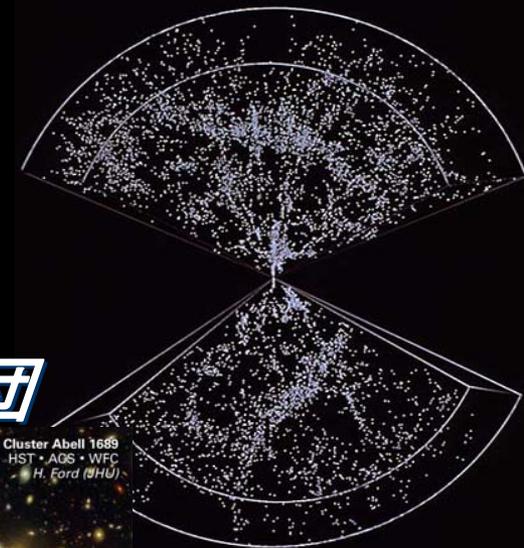
天文学・宇宙物理学の研究対象

宇宙の大構造

銀河群

矮小銀河

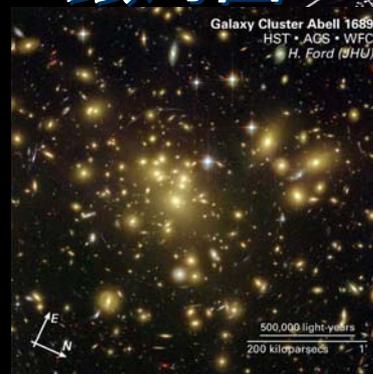
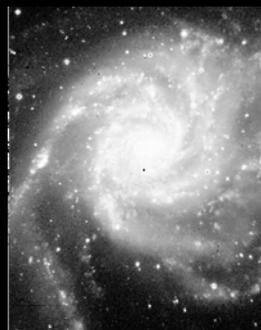
太陽系



銀河

銀河団

星団



天体諸階層の典型的大きさ [光年]

天文学・宇宙物理学研究テーマの分類

■ 対象別：「XX」の起源と進化

- 「XX」 = 惑星、太陽、恒星、星間物質、超新星、コンパクト天体、銀河系(天の川)、銀河、活動銀河核、銀河団、宇宙、時空、生命・文明

■ 波長別：「YY」天文学

- 「YY」 = 電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線、宇宙線、ニュートリノ、重力波

■ 手法別：

- 理論、観測(地上、気球、ロケット、衛星、地下)、実験、数値シミュレーション

天文学・宇宙物理学共通の目標：

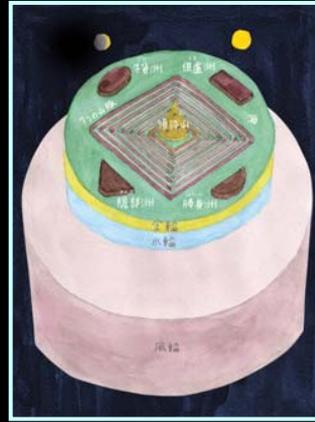
夜空のむこうの世界を探る

- 我々の世界はどうなっているかを解き明かす

古代エジプトの宇宙像



仏教の宇宙像



古代インドの宇宙像



- 直接役に立つわけではなくとも人生を豊かにしてくれる本質的な疑問に挑戦する

- 宇宙は何からできているか？（宇宙論）
- もう一つの地球はあるか？（太陽系外惑星研究）
- 生命はいかにして誕生したのか？（宇宙生物学）

最近20年間の進展

- バリオン以外のダークマターの存在
- 超新星1987Aからのニュートリノの検出
 - ニュートリノ天文学
- 超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見
 - ダークエネルギーの存在／一般相対論の限界？
- 宇宙マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎと広域銀河カタログによる宇宙論モデルの精密検証
 - 標準ダークマターモデル(インフレーションによるゆらぎ、冷たいダークマター、ダークエネルギー)
- ガンマ線バーストの宇宙論的天体説の確定
- 銀河とブラックホールの共進化
- 太陽系外惑星の発見
- 余剰次元にまつわる理論的探求

残された課題（起源と進化）

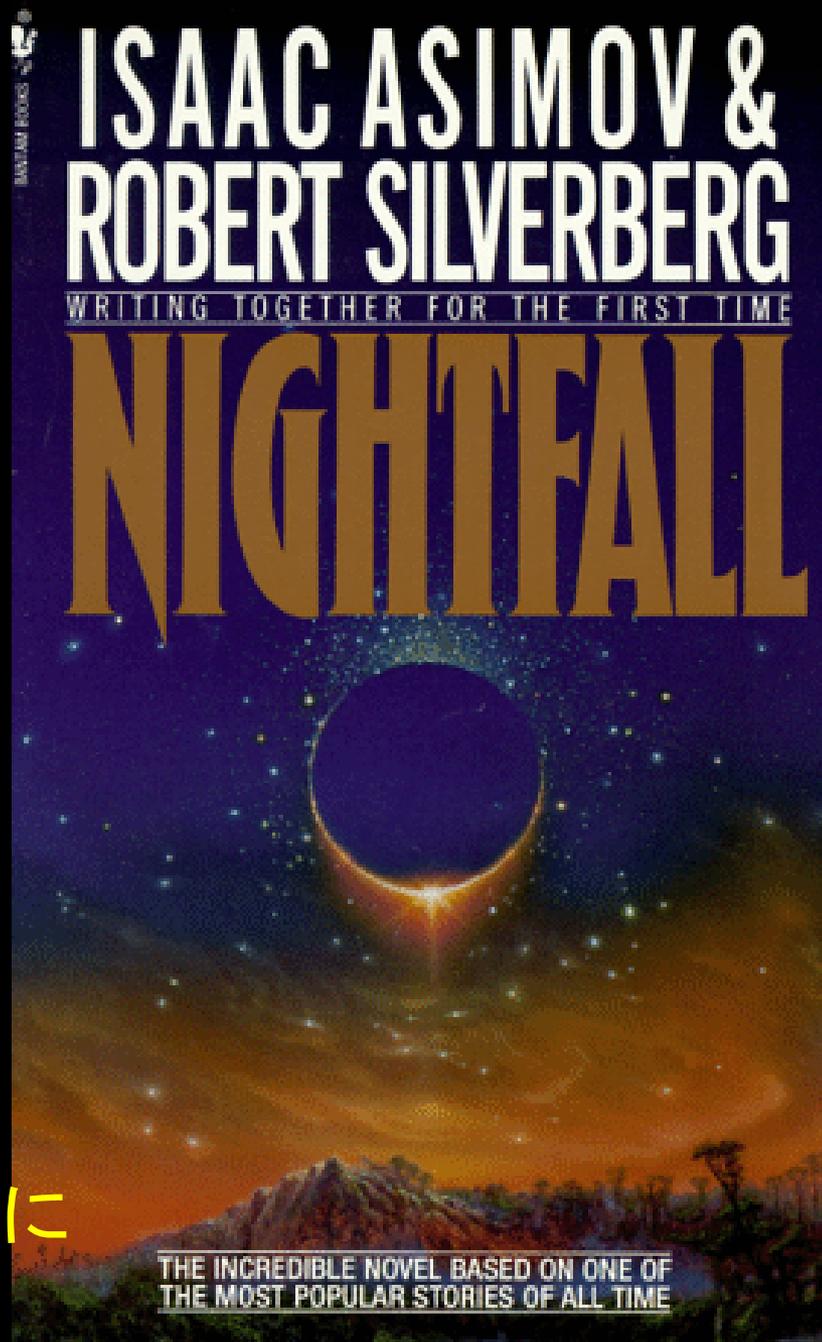
- 宇宙の創生
- ダークマターの直接検出
- ダークエネルギーの性質の解明
- 重力波の直接検出 ⇒ 重力波天文学の開拓
- 高エネルギー宇宙線の起源 ⇒ 粒子線天文学の開拓
- 超新星爆発のメカニズム
- ガンマ線バーストのメカニズム
- 第一世代天体形成
- 星形成
- 系外惑星の探査と理解 ⇒ 宇宙生物学への布石

宇宙のダークエネルギー

夜来たる



6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに
二千年に一度の夜が訪れる



宇宙が観測できる理由

- 夜空が暗いからこそ天体が見える、我々の世界を理解できる (Isaac Asimov: *Nightfall*)
- 星や銀河は輝いているから存在がわかる
- 「暗いところには何も無い」ことを証明できるか？
 - 漆黒の粒子が集積した結果、光を隠しているのでは？ (de Selby in Flann O'Brien: *The Third Policeman*)
 - 真の暗闇を撮影できるか(=ダークエネルギーの観測)
 - 完全な静寂を録音できるか(小林康夫と坂本龍一の対談 UP2008年2月号)
- 宇宙を満たしているものは何か？認識しうるか？

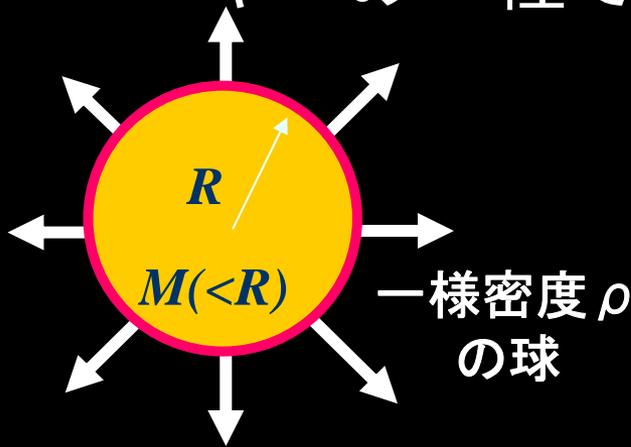
宇宙膨張の方程式

■ ニュートン力学による運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(< R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left(\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度 ρ のみならず圧力 p もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」(Λ : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

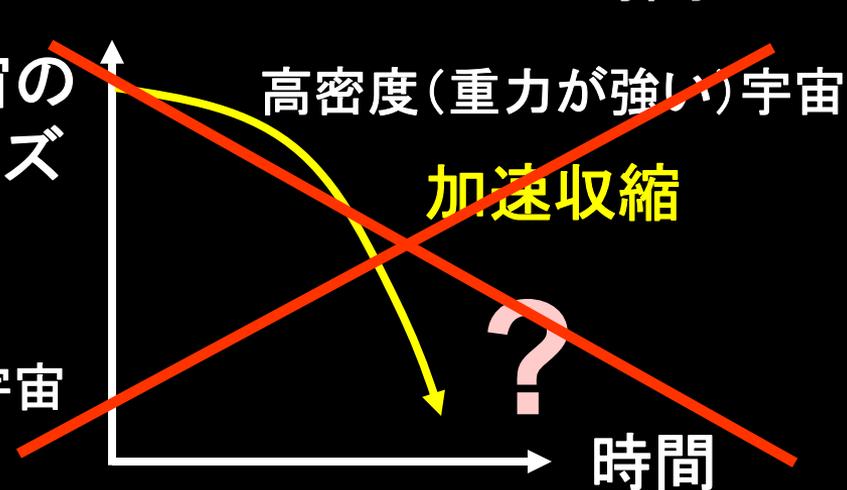
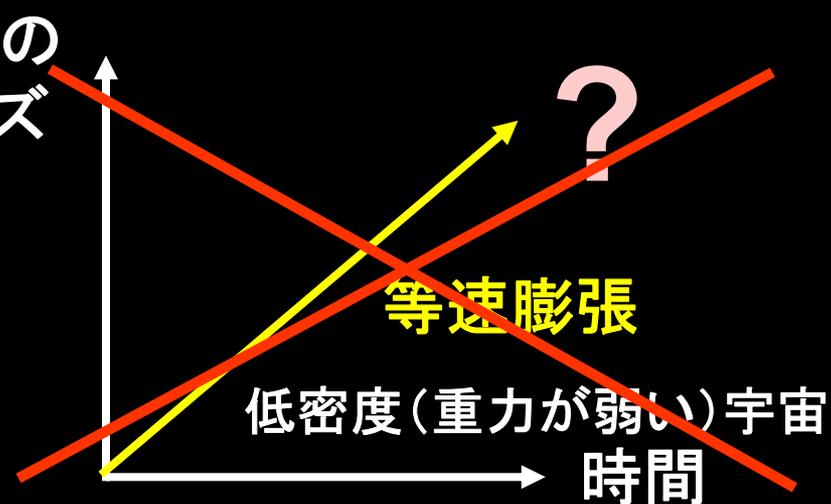
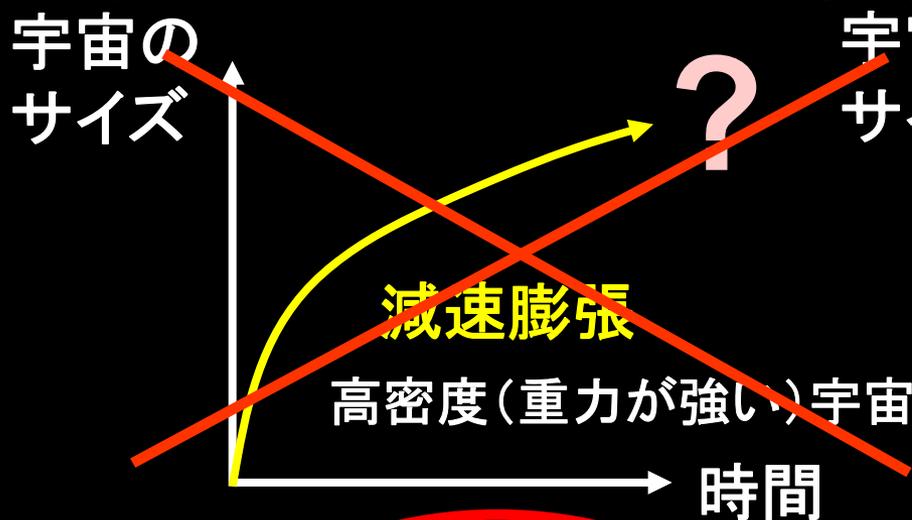


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

フリードマン方程式

宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙膨張の進化の観測を通じて、宇宙を一様に満たしている成分の存在が検出できる

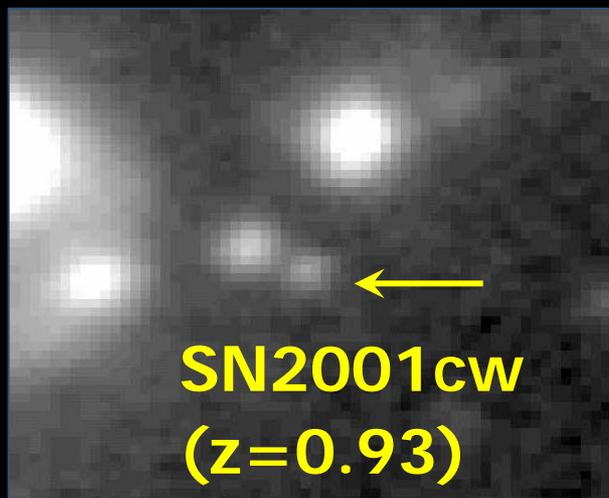


宇宙の標準光源 (ろうそく): Ia型超新星

見かけの明るさ: F

真の明るさ: L

Ia型超新星



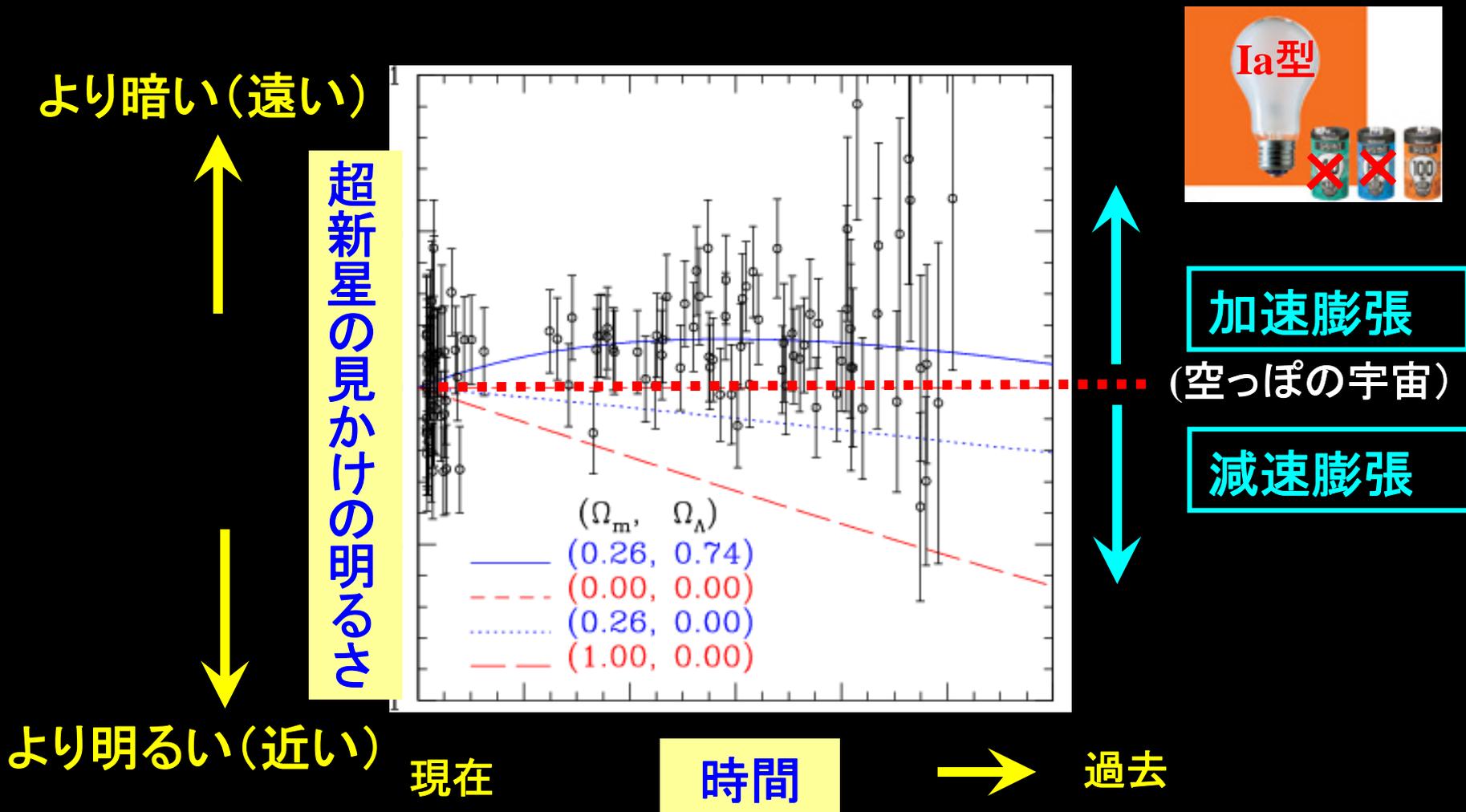
距離: D

超新星までの距離がわかると、その時刻での宇宙膨張の加速度を推定できる

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 宇宙は加速膨張をしていた！ (1998年)

宇宙定数・ダークエネルギーの歴史

- 1916年：一般相対論
- 1917年：アインシュタインの静的宇宙モデル
- 1980年代以降：真空のエネルギー密度

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

宇宙定数 (時空の幾何学量) 物質場 (真空のエネルギー密度?)

移項

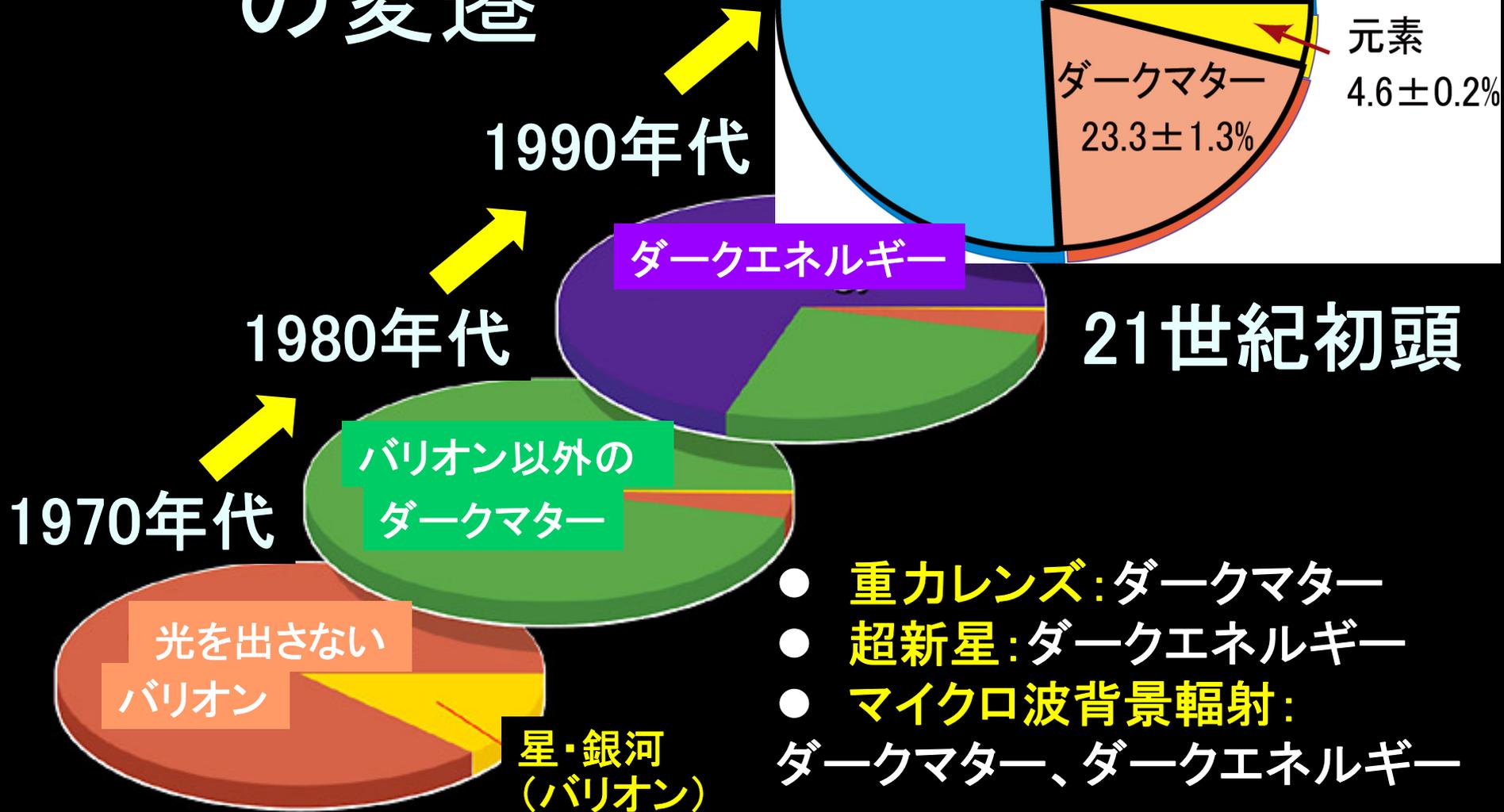
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

- 宇宙定数の自然な大きさ：プランク密度

$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

- 観測的制限： $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$ 物理学史上最大の理論と観測の不一致！

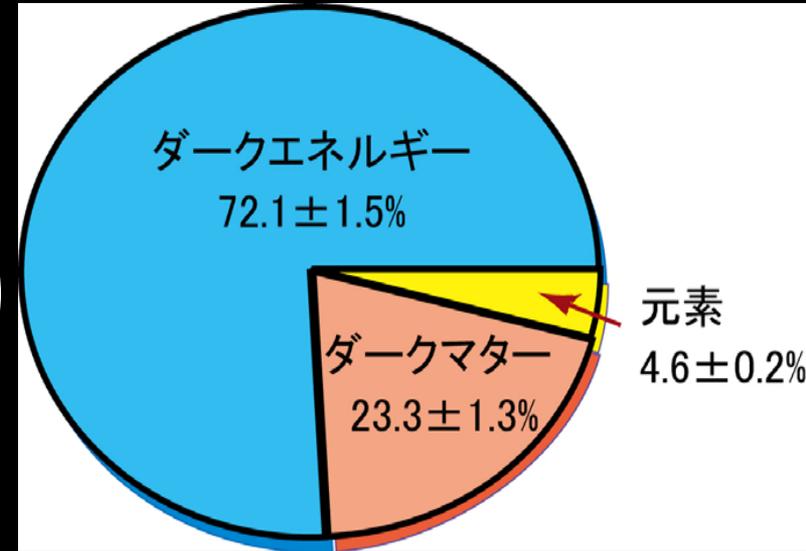
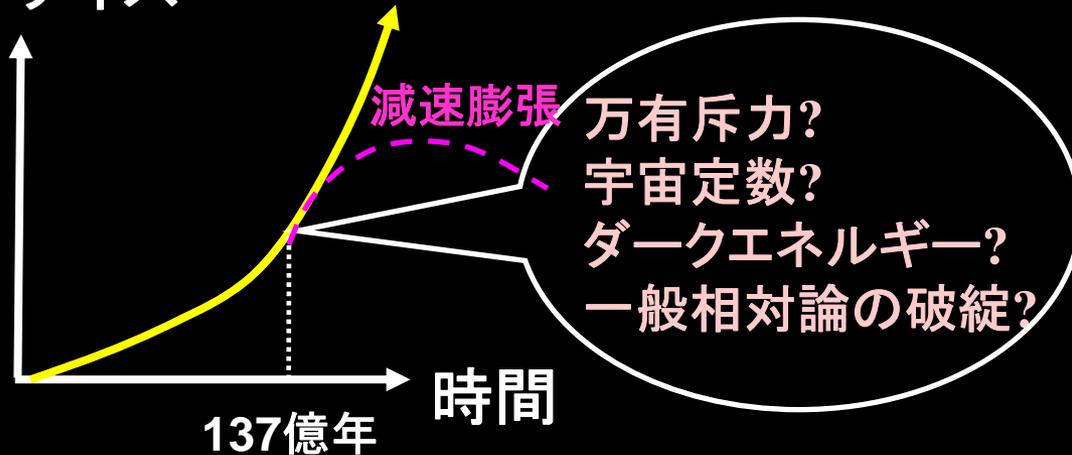
宇宙の組成観 の変遷



暗黒宇宙の組成とダークエネルギー

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



■ ダークエネルギーの正体は何か？

- 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数 (1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
- 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻

■ いずれであろうと21世紀の科学を切り拓く鍵

太陽系外惑星

太陽系外惑星とはどんなものか

- 水金地火木土(天海冥)のその先？
- わが太陽系の拡大
 - 1781年:天王星の発見
 - 1846年:海王星の発見
 - 1930年:冥王星の発見
- 1995年:初めての太陽系外惑星の発見
- 哲学から科学へ
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在する
 - エピキュラス (紀元前341年～270年)
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない
 - アリストテレス (紀元前384年～322年)

第二の地球はあるか？



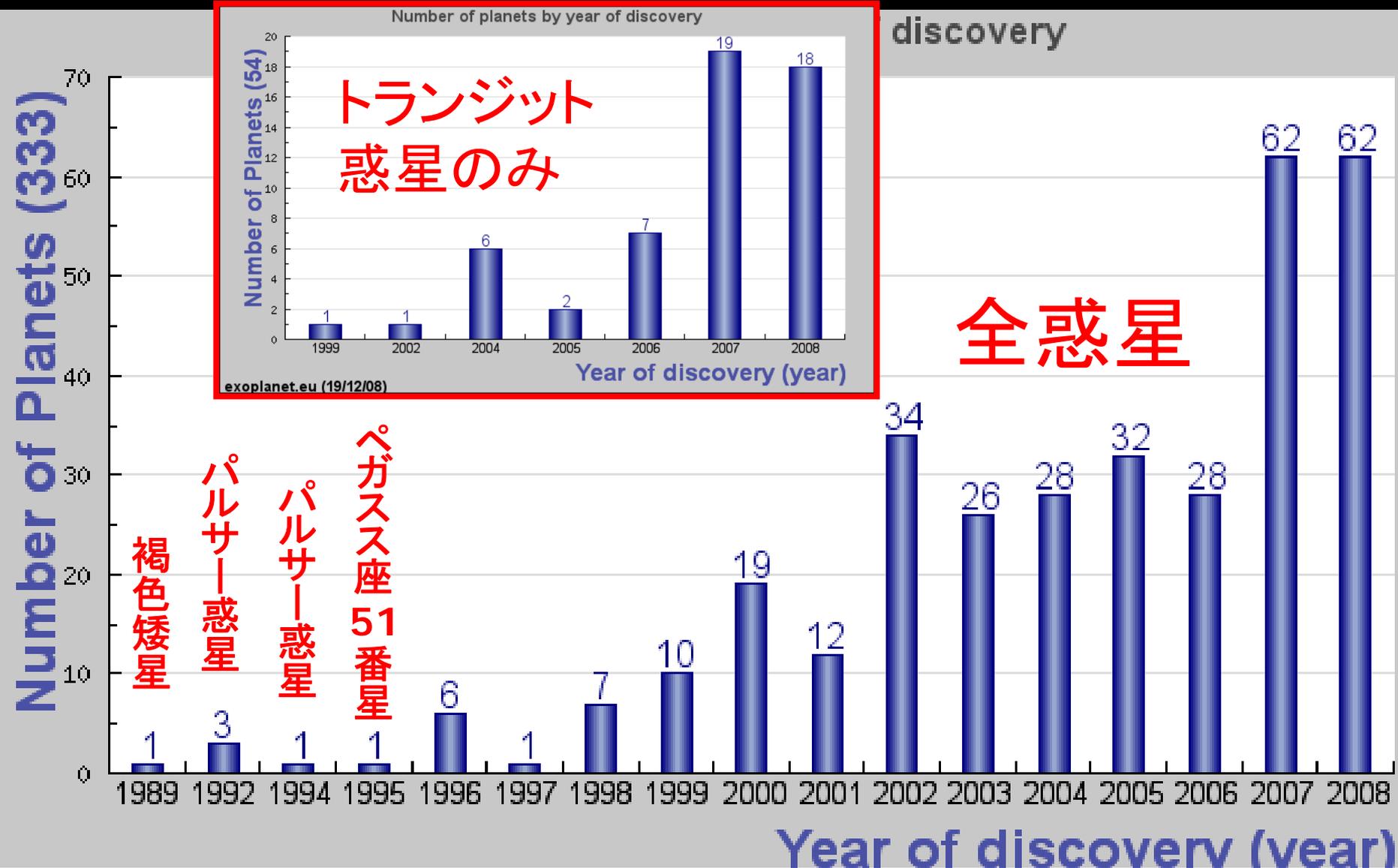
- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(居住可能)
 - +偶然？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>

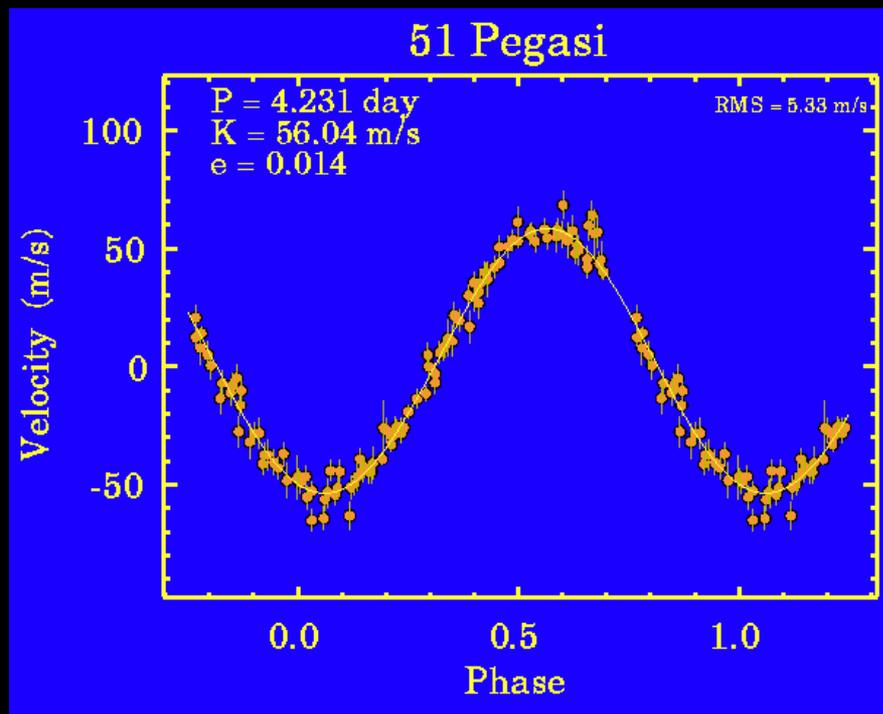
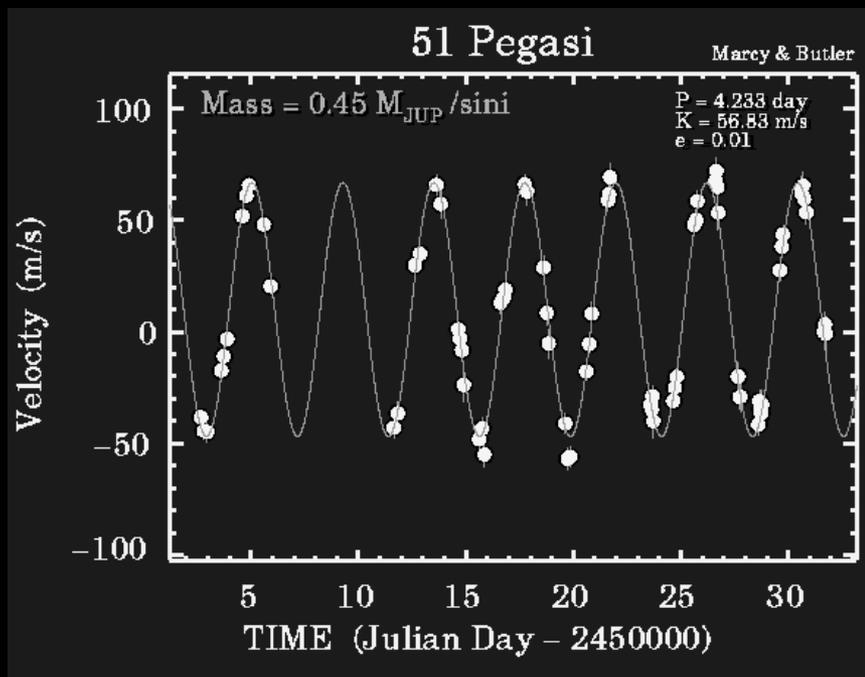
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

太陽系外惑星（候補）の発見年表



ペガサス座51番星 ～初めての太陽系外 惑星の発見～

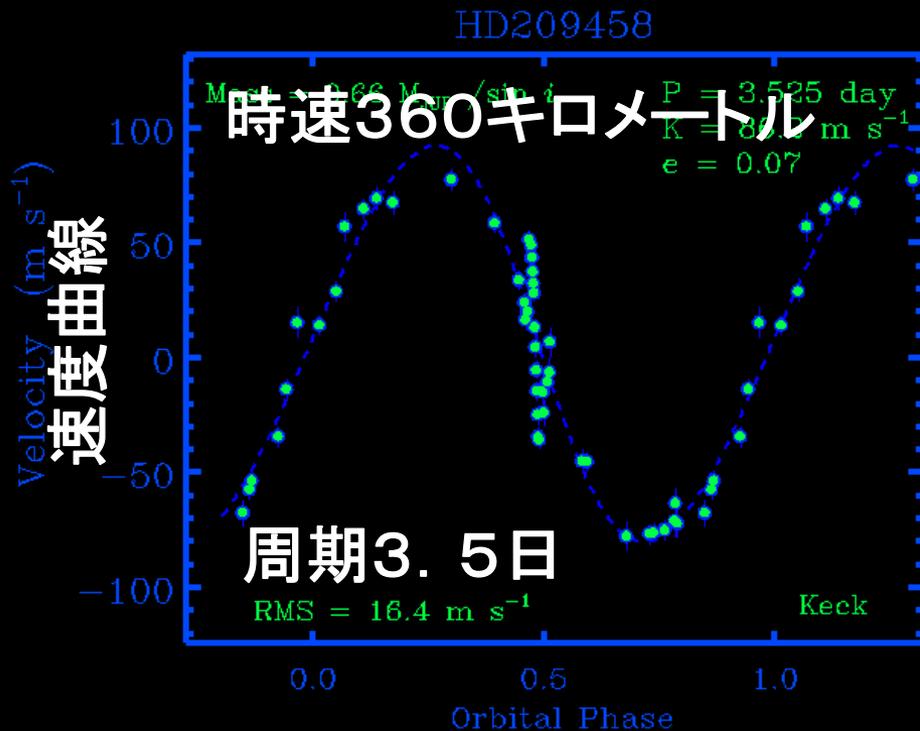
- メイヨール & ケロス (1995年)



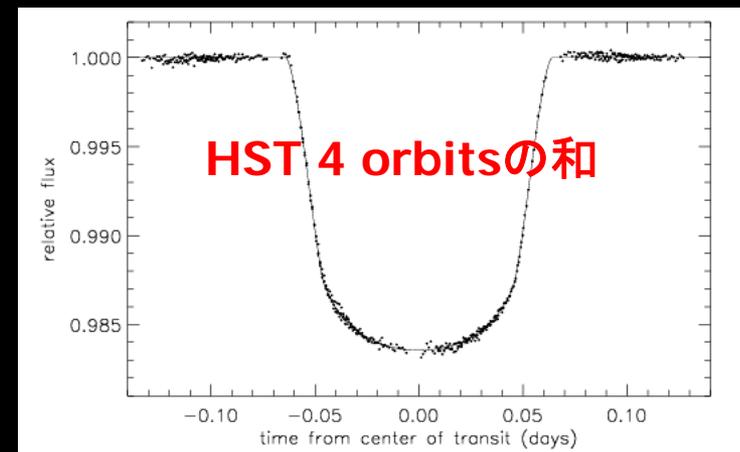
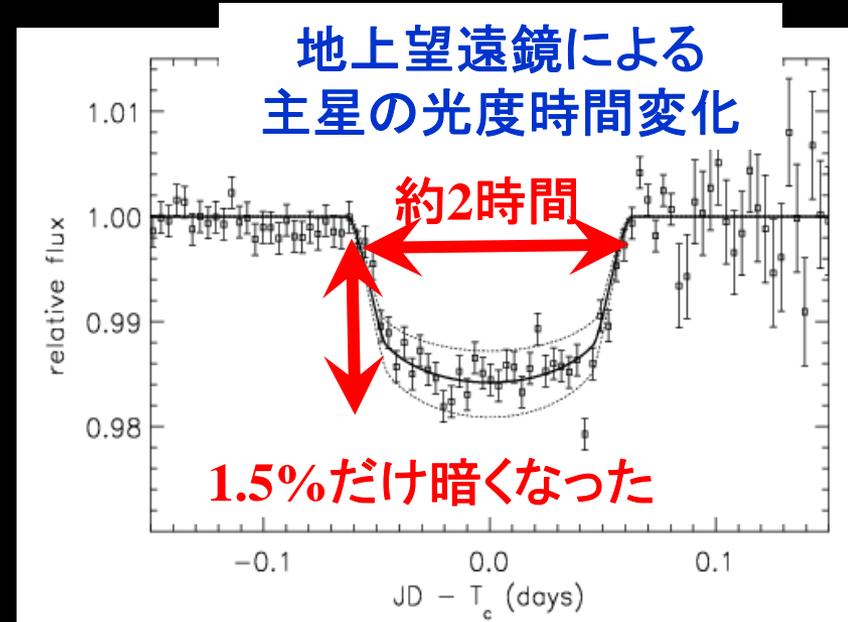
周期がわずか4.2日！

最初の太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458b (2000年発表)

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

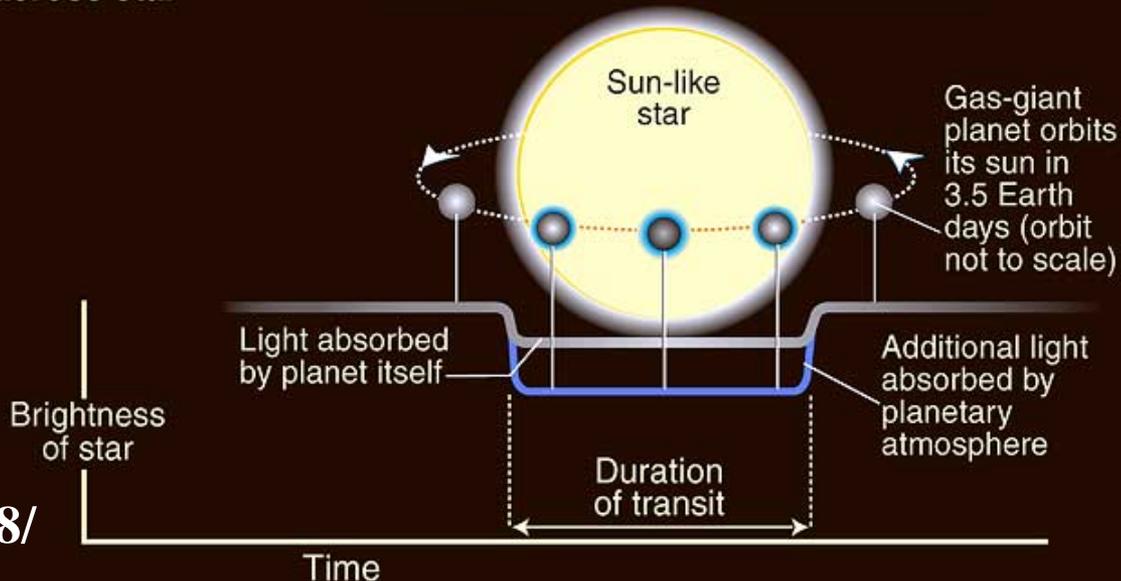
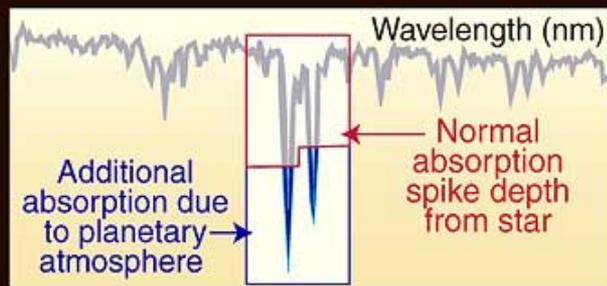


Brown et al. (2001)

HD209458bの 惑星大気初検出 (2001年)

[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



- 2000年 系外惑星の食を検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を 0.4g/cc と推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al.)

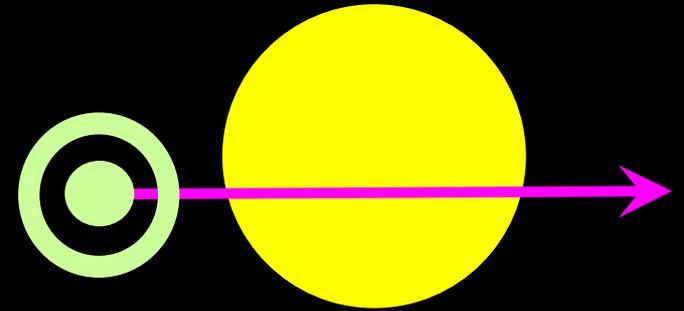
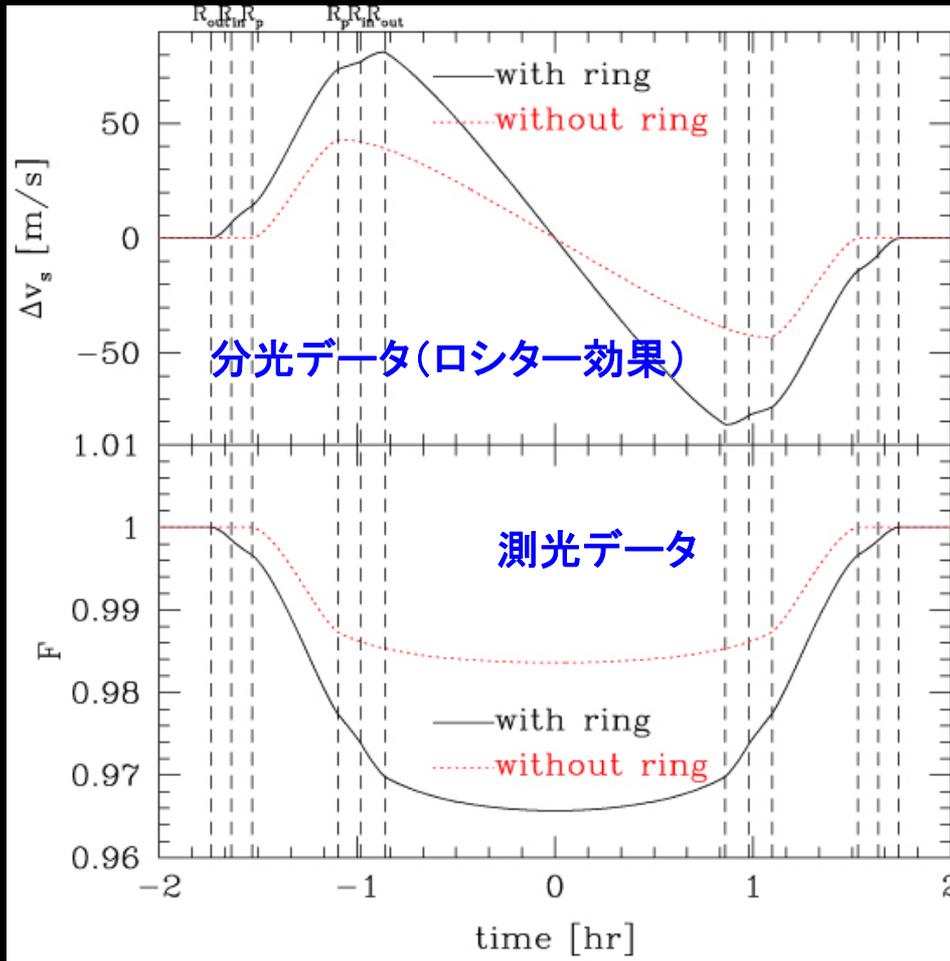
今後の系外惑星研究ロードマップ

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
 - 惑星大気の実見 (2002)
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
 - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
-

- 系外惑星リング、衛星の実見
- 地球型惑星、居住可能惑星の実見
- 惑星の直接検出(測光&分光)
- バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定
- 地球外生命の実見



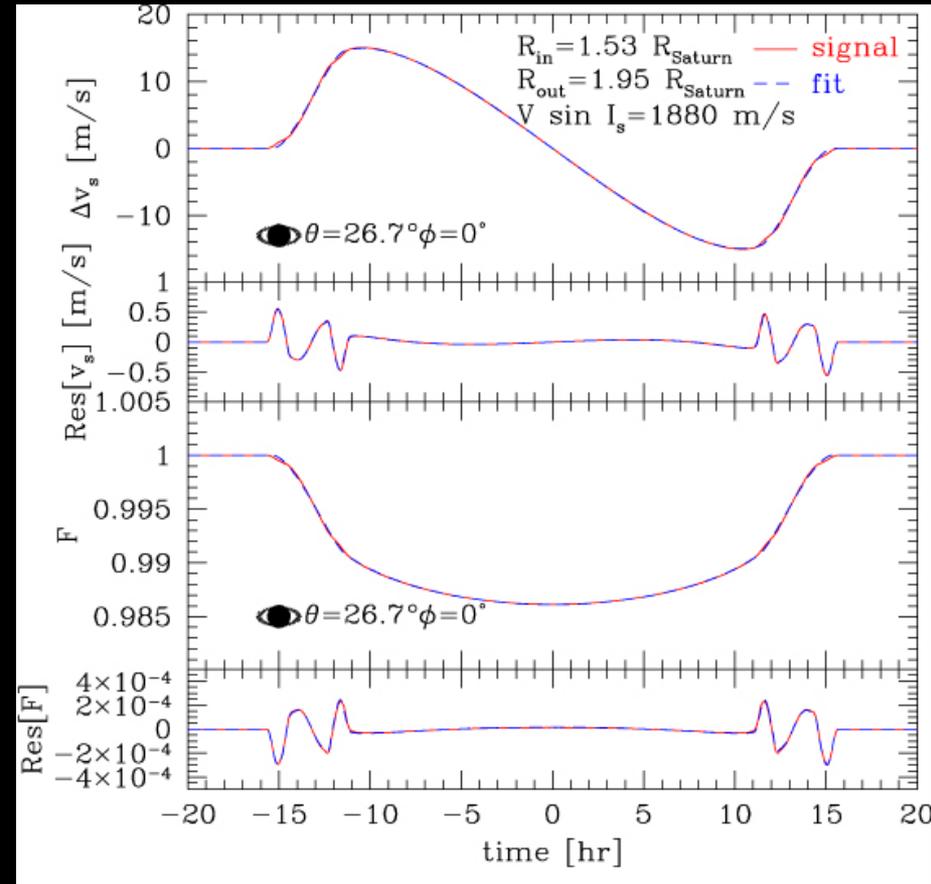
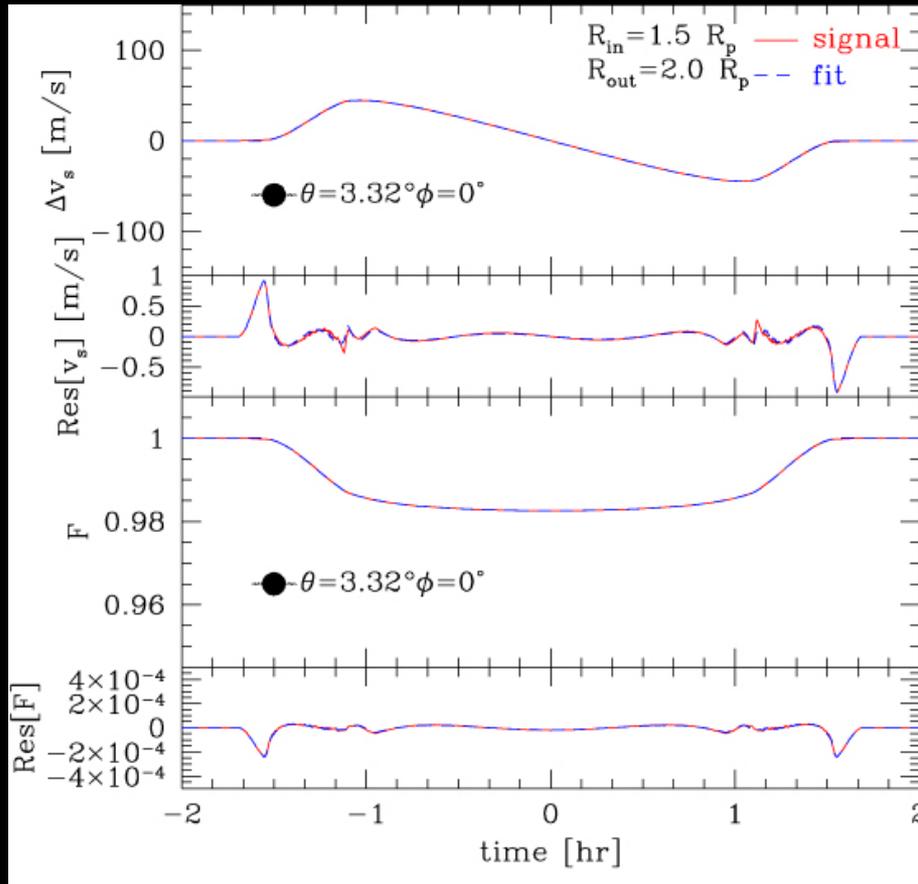
惑星リング存在の兆候を探れるか？



- リングの外径・内径、間隙、惑星本体の通過時に不連続な変化
- リングなしでフィットしたモデルとの残差を統計解析

Ohta, Taruya & Suto ApJ 690(2009)1

HD209458bと土星の場合どう見える？

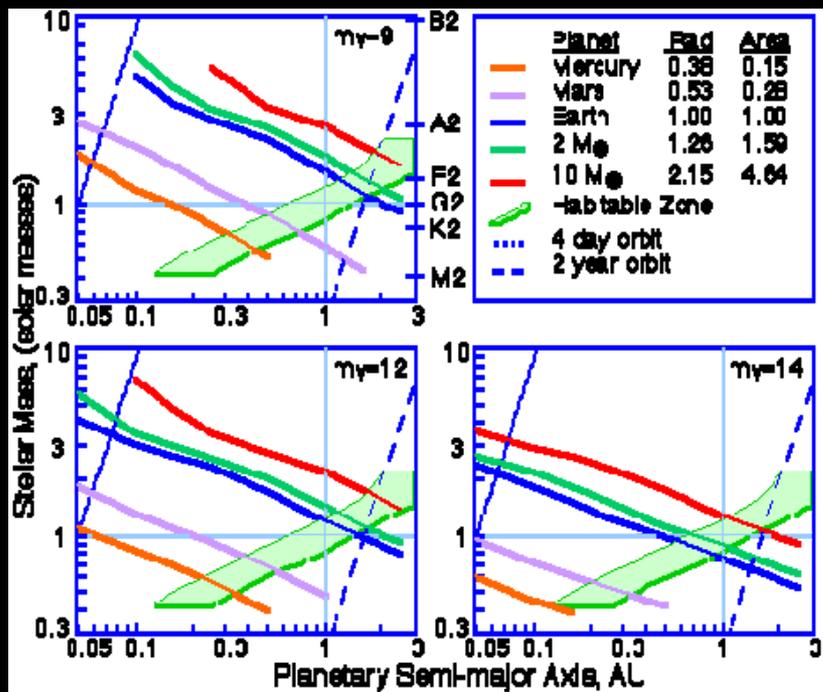


- 「もしリングがあれば」何とか検出可能 (S/N=3)

Ohta, Taruya & Suto ApJ 690(2009)1

ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星の測光サーベイ:
地球型(±ハビタブル)惑星の発見をめざす

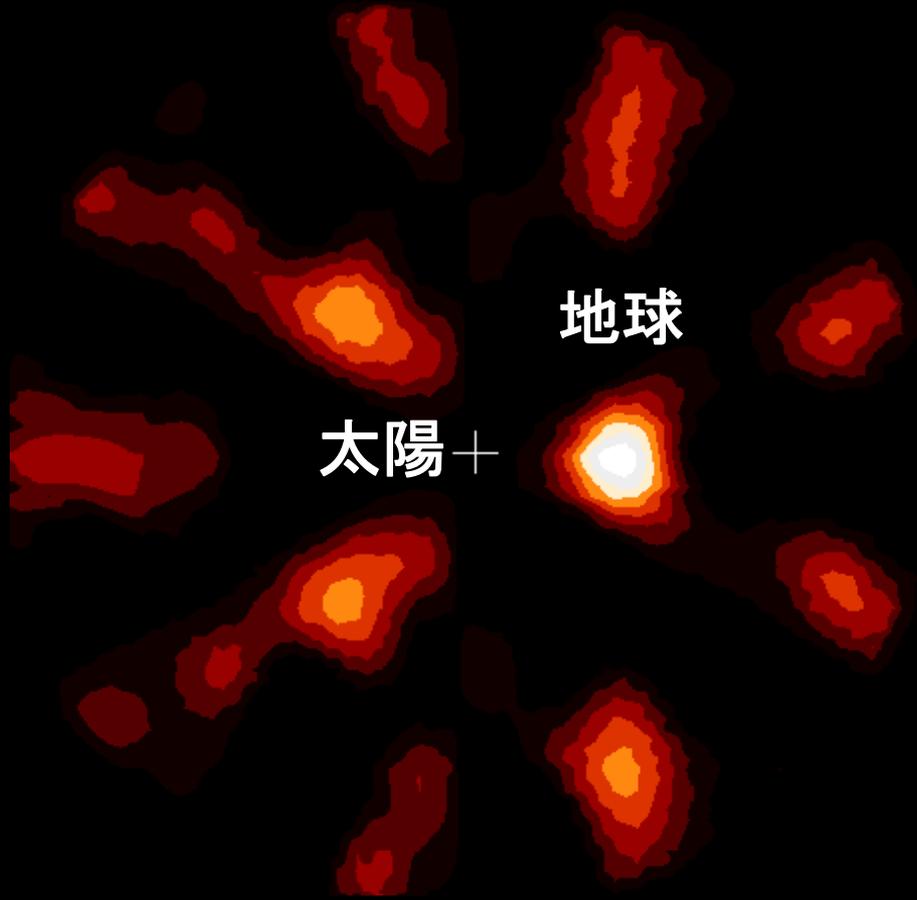


<http://kepler.nasa.gov/>

ダーウィン衛星

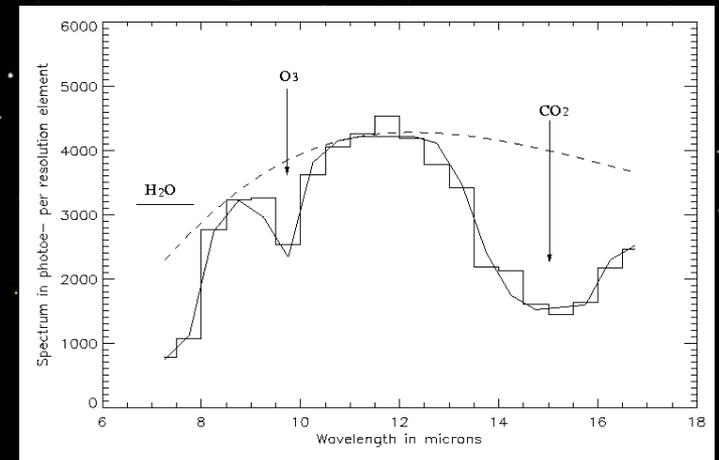
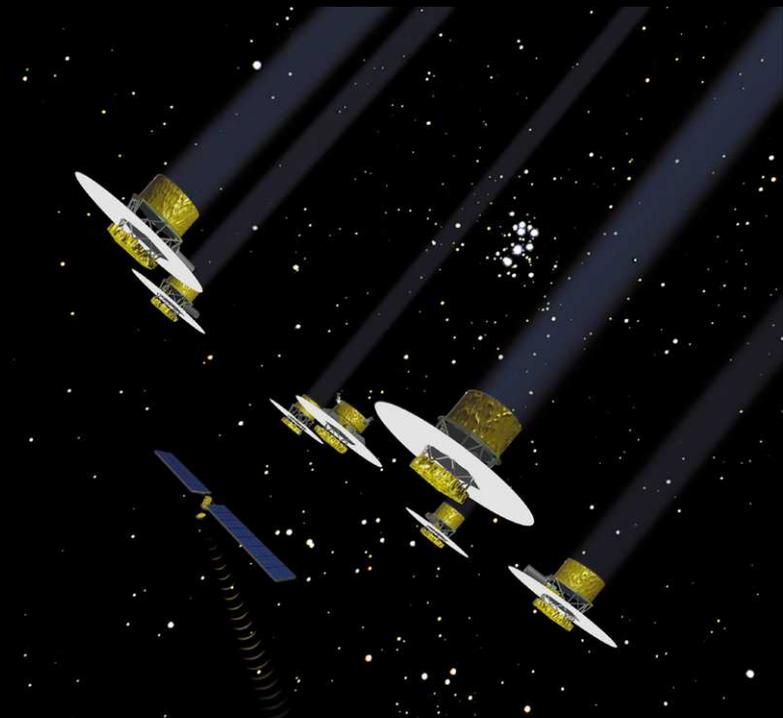
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

赤外線での惑星の直接撮像を目指す



10pc先においた太陽と地球の観測予想図

<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>

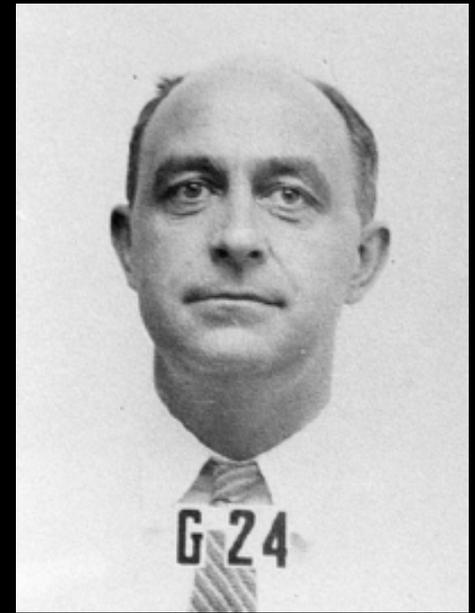


宇宙赤外線干渉計群
測光・分光観測

Fermi's question

- Where are *they*?

- Enrico Fermi during a luncheon conversation at Los Alamos (1950)



バイオマーカー（生物存在の証拠）の同定

■（居住可能）地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

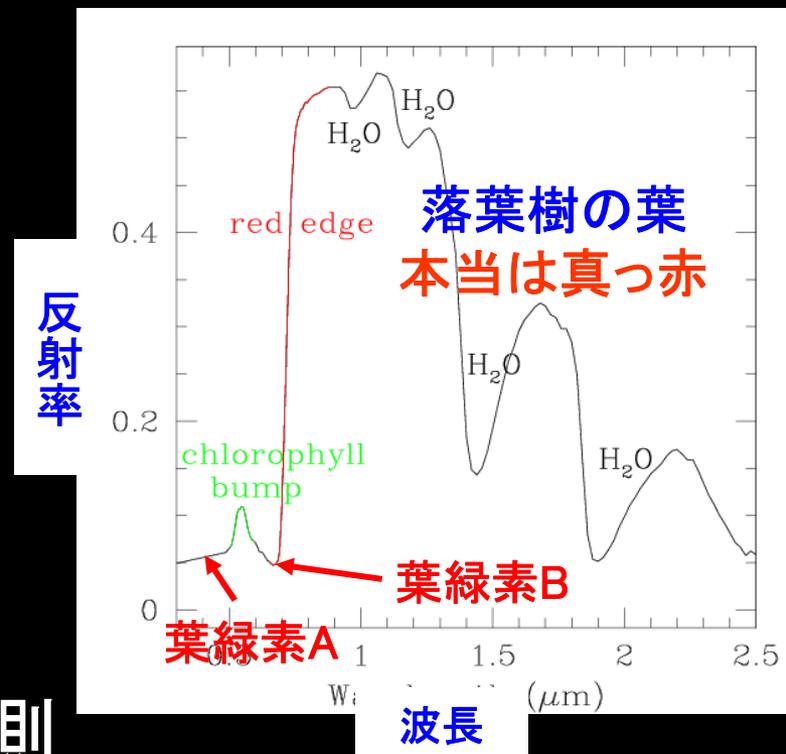
■ Biomarker の探求

■ 酸素、オゾン、水の吸収線

■ 植物の red edge

■ *Extrasolar planets from extrasolar plants*

■ とにかく精密測光・分光観測



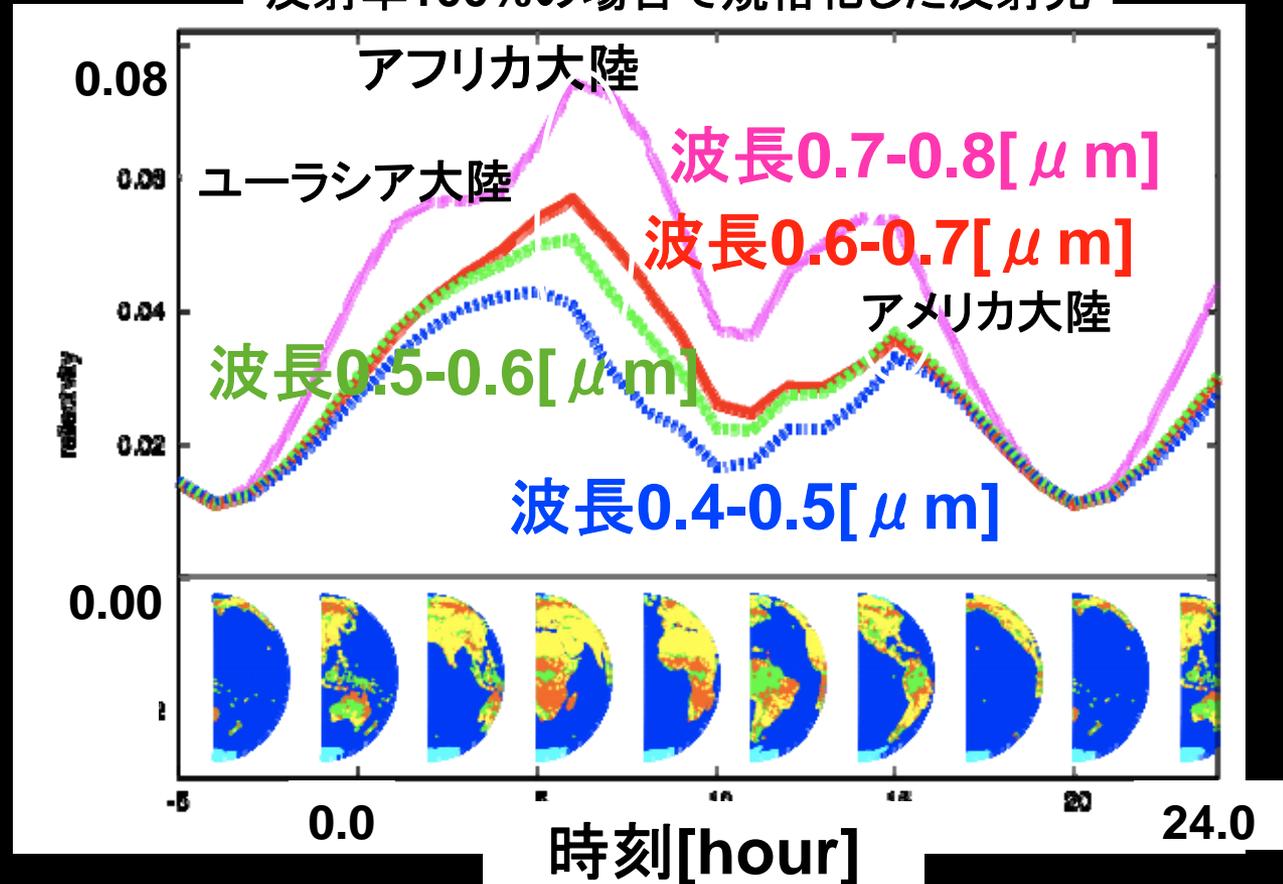
Seager, Turner, Schafer & Ford:
astro-ph/050330

A Pale Blue Dot



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

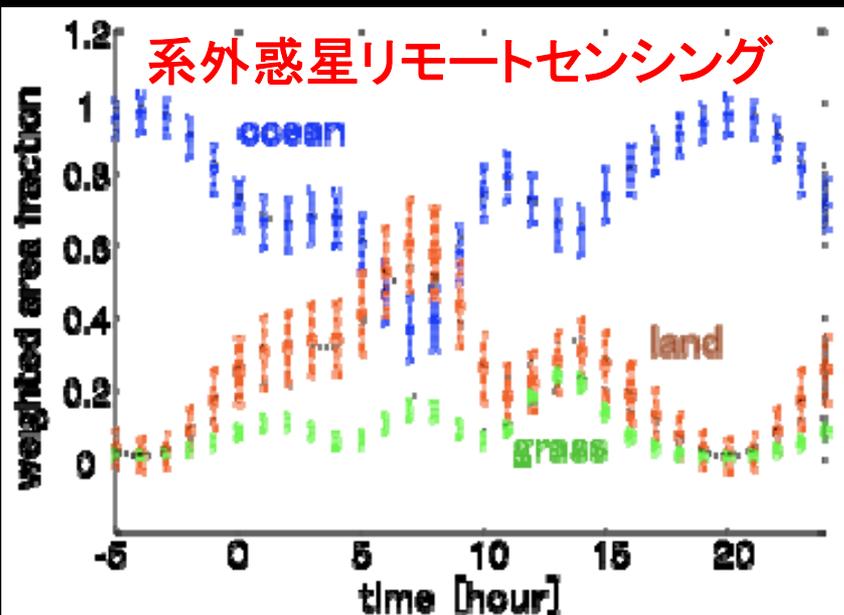
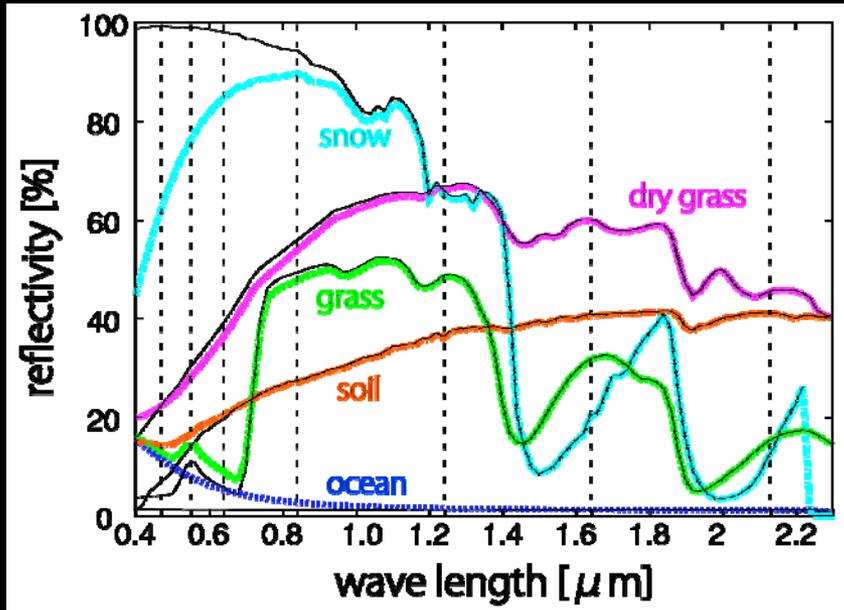
反射率100%の場合で規格化した反射光



- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

Fujii et al. in prep.

地球の色から表面情報を再構築する

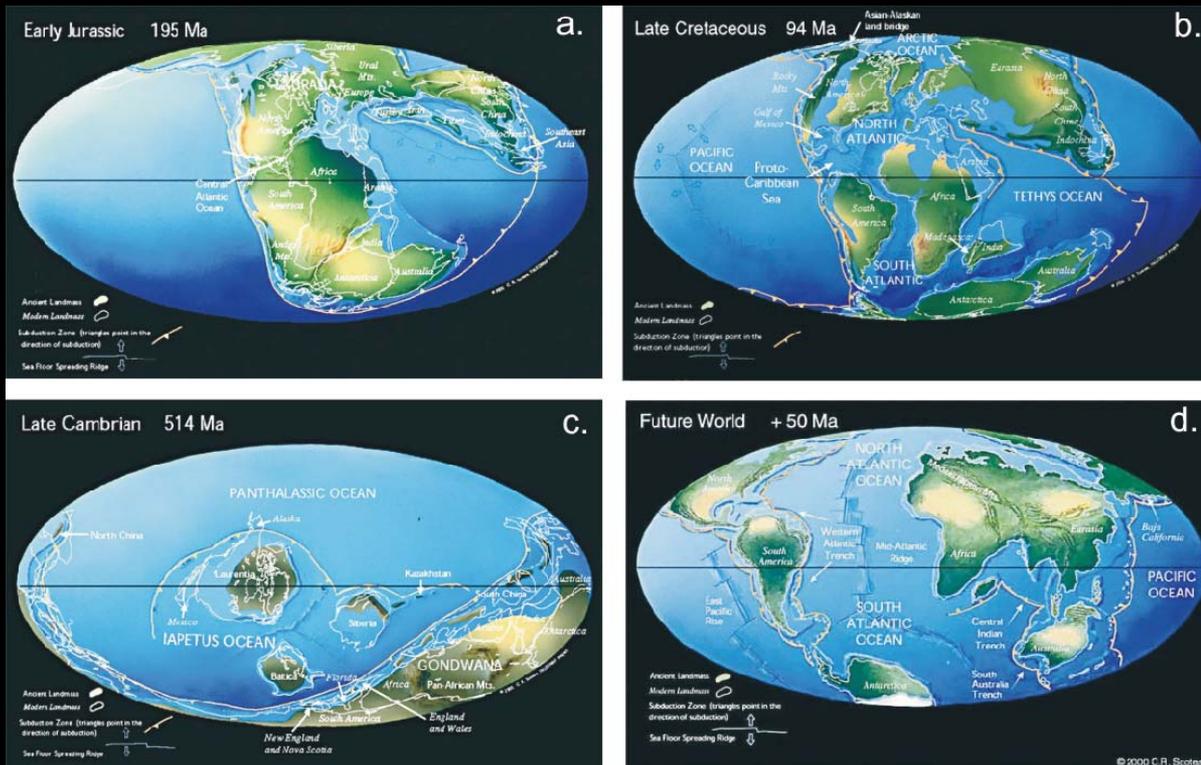


Fujii et al. in prep.

- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径2mの宇宙望遠鏡で2週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮
- レイリー散乱の一次項近似
- 5つの成分 (ocean, soil, grass, dry grass, snow) で近似し、7つの測光バンドデータから再構築
- 結構イケテル!

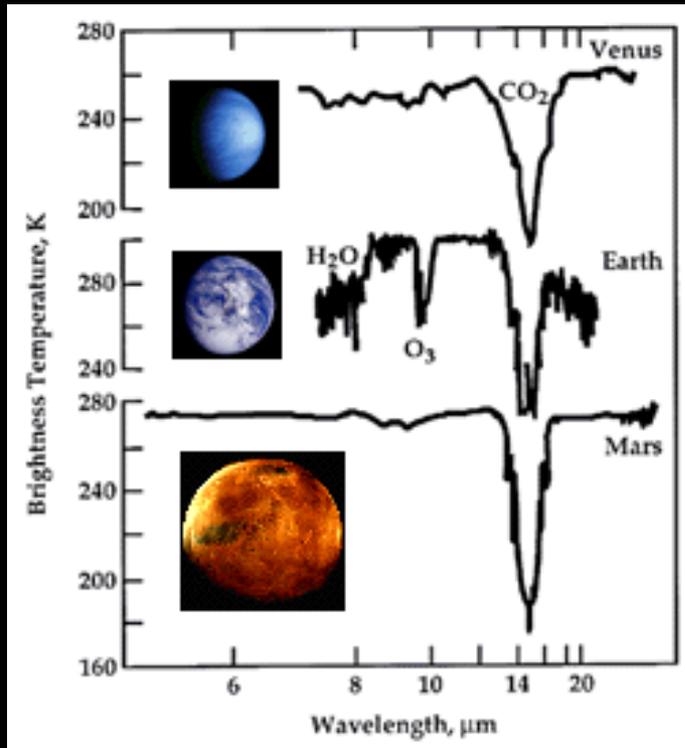
異なる地球環境下での 測光観測シミュレーション

- 系外地球型惑星が、「現在」の地球と全く同じ環境にあるわけではない
- 地球のパラメータを変化させた模擬観測



例えば、左の
Paleomap project
(Scotese 2002)の
ようなデータを用いて、
過去の地球の
模擬観測を行う

系外惑星から宇宙生物学へ



- 地球型惑星の発見
- 居住可能(ハビタブル)惑星の発見
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、核爆発、植物、、、
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する

直接見て帰ることができない距離にある惑星に生物が存在するかどうかを天文観測だけで説得できるか？ Biomarker を特定できるか？

「夜空のむこう」を探ることで、従来全く予想されていなかった新しい科学が発展しつつある

■ 宇宙の果ての観測から微視的世界の新しい階層が発見された

- 宇宙の96%の正体は理解されていない
- ダークマターとダークエネルギーの解明は新しい自然法則を探る鍵

■ 天文学から宇宙生物学へ

- 1995年初めての系外惑星発見
- 地球型居住可能(水が液体として存在する)惑星の発見へ
- 遠くの惑星に生物の兆候を探る天文学的試み

